

# Quantentechnik mit Vielteilchensystemen

Quantenteilchen sind von verwirrender Natur. Sie können sich in ein- und demselben Moment an mehreren Orten befinden und unterschiedliche Zustände einnehmen. Zwei Teilchen lassen sich zudem »verschränken«: In diesem Fall sind die Eigenschaften der Partner sogar über weite Distanzen hinweg miteinander verbunden. Das Verhalten eines Teilchens in Köln, dessen Pendant sich in Hamburg befindet, lässt sich dann nur verstehen, wenn man beide als Gesamtobjekt betrachtet.

Bildet eine große Zahl von Quantenteilchen ein Quanten-Vielteilchensystem, so beobachtet man weitere erstaunliche Effekte. Supraflüssigkeiten wie Helium sind bei tiefer Temperatur nicht zähflüssig wie Öl, sie zeigen auch keine innere Reibung wie Wasser. Ähnlich ist es mit Supraleitern: Durch sie fließt der Strom der Elektronen ohne den geringsten Widerstand.

## ELEKTRONEN IN WINZIGEN GEHEGEN

Solche Systeme weisen so genannte Quantenkohärenz auf. Die vielen Teilchen sind ungewöhnlich stark korreliert, ihr jeweiliges Verhalten hängt eng zusammen und ist aufeinander abgestimmt. Auf dieser nur quantenphysikalisch erklärbaren Qualität beruht neben der Supraleitung auch der Quanten-Hall-Zustand: Während freie Elektronen immer genau mit einer ganzen Elementarladung auftreten, können sich in Festkörpern aus mehreren Elektronen zusammengesetzte »Quasiteilchen« bilden, die gebrochene Ladungswerte annehmen.

Im historischen Rückblick zeigt sich: Die meisten dieser Phänomene wurden zufällig entdeckt. Doch heute können Wis-

senschaftler das Verhalten von Elektronen in Festkörpern immer besser untersuchen und mit ultragekühlten Atomen echte Vielteilchen-Phänomene erzeugen. Im kommenden Jahrzehnt wird diese neue Quantentechnik sowohl die Grundlagenforschung befruchten als auch neue Technologien hervorbringen.

In Festkörpern ist die Kontrolle der Quantenkohärenz am weitesten bei Halbleitern fortgeschritten. Mit modernen Verfahren gelingt es beinahe perfekt, kristalline Materialien zu züchten und Elektronen darin in winzige Gehege einzusperren. Dadurch entstehen unter anderem »Quantenpunkte«, mit denen sich neuartige Experimente durchführen lassen. Ein Quantenpunkt ähnelt einem künstlichen Atom, in dem die Kraft, welche die Elektronen bindet, exakt eingestellt werden kann. Auf dieser Grundlage lassen sich raffinierte elektronische und laseroptische Geräte herstellen.

Darüber hinaus können Forscher seit einiger Zeit Quantenpunkte, -drähte und auch -mulden erzeugen, die wahlweise miteinander oder mit anderen Nanostrukturen kontrolliert wechselwirken. Dies half unter anderem dabei, das jahrzehntealte Rätsel des so genannten Kondo-Effekts zu lösen. Er tritt auf, wenn bei sinkender Temperatur der elektrische Widerstand in nichtmagnetischen Kristallen, die magnetische Störstellen enthalten, zunimmt, anstatt abzunehmen. Je präziser es den Forschern gelingt, die Struktur von Materialien in kleinsten Dimensionen zu manipulieren, desto detaillierter können sie solche und ähnliche Kohärenzphänomene untersuchen.

Auch in der Atomphysik gab es erstaunliche Fortschritte. Vor 15 Jahren gelang es Physikern nach langen experimentellen Bemühungen endlich, die so ge-

nannte Bose-Einstein-Kondensation zu beobachten. Bei diesem Urtyp der Quantenkohärenz verhalten sich sämtliche Atome eines extrem kalten Gases auf identische Weise. Mit diesem Durchbruch begann eine neue Ära der Vielteilchenphysik. Forscher können seitdem die Stärke der atomaren Wechselwirkung in solchen Gasen über weite Bereiche kontrollieren. Indem periodisch angeordnete Laserstrahlen auf die Gase einwirken, lassen sich die Bewegungen der Gasatome ganz ähnlich beeinflussen, wie dies bei Elektronen in kristallinen Festkörpern durch die internen elektrischen Felder geschieht<sup>1</sup>.

## DAS BRINGT DIE ZUKUNFT

Bei der Erforschung neuartiger Phänomene der Vielteilchen-Quantenphysik ergänzen sich die Experimente mit festen Materialien und mit Systemen kalter Atome oder Moleküle zunehmend. Das Periodensystem der chemischen Elemente liefert zudem eine fast unbegrenzte Vielfalt von festen Verbindungen für die Entdeckung neuer Vielteilchenzustände<sup>2</sup>, und aus immer komplexeren Verbindungen entstehen nun Nanostrukturen mit präzise konstruiertem atomarem Aufbau<sup>3,4</sup>. Die Experimente könnten Hinweise darauf liefern, warum die nützliche Eigenschaft der Supraleitung bislang nur bei extrem tiefen Temperaturen auftritt. Supraleiter, die auch bei Raumtemperatur funktionieren, würden ein weites Spektrum von Anwendungen für verlustfreie Stromübertragung ermöglichen.

Während die meisten Experimente mit kalten Atomen bislang an Bosonen – also Teilchen mit ganzzahligem Spin – durchgeführt wurden, eröffnen sich durch ähnliche Experimente an Fermionen – Teilchen mit halbzahligem Spin – interes-

Schlüsselexperimente an der Grenze zwischen Festkörperphysik und Quantenoptik am Max-Planck-Institut für Quantenoptik demonstrierten zwei fundamental unterschiedliche Zustände kalter Atome auf laserinduzierten optischen Gittern: einen »Mott-

Isolator«, in dem alle Atome auf Gitterplätzen lokalisiert sind (Bild 1), und ein »Suprafluid«, das sich widerstandslos durch das Gitter bewegen kann. Letzteres verhält sich analog zur »Supraleitung« von Elektronen in Feststoffen (Schneider, U. et al., *Science* **322**, 1520, 2008).

- Die präzise Kontrolle von Quantenphänomenen weist Physikern den Weg zu grundlegend neuen Erkenntnissen und technologischen Anwendungen.
- Dabei kommt es entscheidend darauf an, Festkörperstrukturen mit einer Genauigkeit von wenigen Nanometern aufzubauen.
- Kooperationen zwischen Atom- und Festkörperphysikern eröffnen neue Perspektiven für die Kontrolle quantenmechanischer Vielteilchensysteme.

sante neue Perspektiven. Die Berechnung fermionischer Vielteilchensysteme, zu denen auch Elektronensysteme in Festkörpern gehören, bereitet auch den modernsten theoretischen Methoden große Schwierigkeiten. Der Einsatz kalter Atome als »Quantensimulatoren« für Elektronensysteme könnte daher zu völlig neuen Erkenntnissen führen.

Ein weiteres Fernziel solcher Forschungen ist der Quantencomputer. Er soll die Quantenkohärenz nutzen, um Rechenprobleme zu lösen, bei denen klassische Methoden versagen. Statt mit den herkömmlichen Bits arbeitet ein solcher Rechner mit Quantenbits, kurz Qubits, die als Überlagerung zweier Quantenzustände verwirklicht werden und so zu Rechenkapazitäten führen, die im Ergebnis am ehesten mit denen massiv paralleler Computer verglichen werden können. Qubits werden derzeit zum Beispiel in Form von Atomen, Molekülen oder Ionen realisiert, die in optische Fallen gesteckt oder in Festkörper implantiert werden. Echte Quantencomputer wird es zwar vermutlich auch in zehn Jahren noch nicht geben, doch erste bescheidene Ansätze dazu könnten schon bald bei Datenübertragung und -verschlüsselung Anwendung finden<sup>5</sup>.

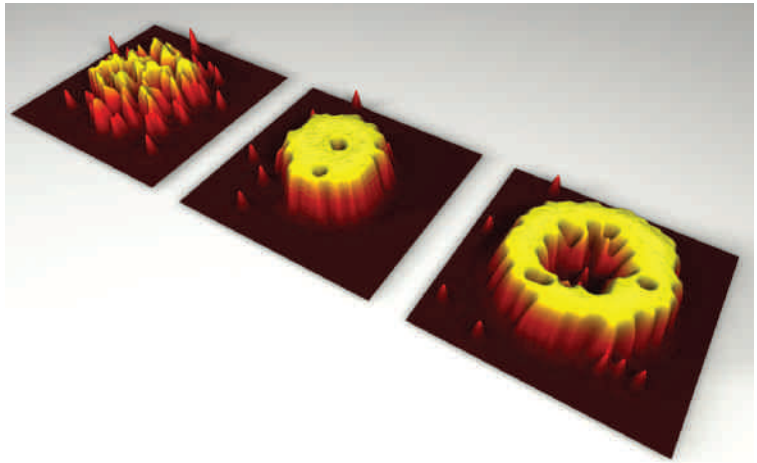
Davon wird auch die Theorie der Quanteninformation profitieren, die wiederum die Entwicklung neuartiger Rechenmethoden für die Beschreibung von Vielkörpersystemen voranbringt<sup>6</sup>. Ein Ziel ist es, korrelierte Quantenteilchen in Vielkörpersystemen vor unerwünschten Störungen aus der Umgebung<sup>7</sup> zu schützen, da ansonsten die Kohärenz verloren geht. Dieses so genannte Dekohärenzproblem ist ein Haupthindernis für Quantencomputer – aber auch für die Vielteilchenphysik im Allgemeinen.

Um die enormen Möglichkeiten der Quantenkohärenz in Systemen mit vielen Teilchen auszuschöpfen, müssen wir noch erhebliche Forschungsanstrengungen unternehmen. Nötig sind neue Methoden zur Kühlung von Gasen sowie zum Aufbau von hybriden Systemen, die

Festkörper-Nanostrukturen und Systeme aus kalten Gasen in sich vereinen. Der Aufwand dürfte sich allerdings lohnen: Jeder Fortschritt auf dem Gebiet der Quantentechnik verspricht tiefere Erkenntnisse und überraschende Anwendungen.

### Bild 1 | Dichteverteilungen auf atomarer Ebene

Das Bose-Einstein-Kondensat (links) zeigt große Dichteschwankungen, während diese in dem Mott-Isolator (Mitte und rechts) unterdrückt sind.



### Bild 2 | Wellenfunktionen von Valenzelektronen in einem Supraleiter und in einem künstlichen Übergitter

Dotiertes  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  (links) ist ein Hochtemperatur-Supraleiter. Seine elektronische Struktur wurde in ein künstliches Übergitter übertragen (rechts). Es besteht aus dem Metall  $\text{PrNiO}_3$  und dem Isolator  $\text{PrScO}_3$ . Das Verhalten der Elektronen in diesen Systemen macht sie zu Kandidaten für künstlich erzeugte Hochtemperatur-Supraleitung<sup>8,9</sup>.

